

光学系统设计技巧 (续)

郑保康

(云南北方光电仪器有限公司 昆明 650114)

(续 2010 年 No.1)

§ 7.4 怎样使用阻尼最小二乘法程序

阻尼最小二乘法的最大特点是它不直接求解象差线性方程组,而是通过求评价函数的极小值解,求象差方程组的最小二乘解。它主要适用于象差个数 m 大于自变量个数 n 的情况。虽然加入了阻尼因子以后,对 $m \geq n$ 的情形也可以求得最小二乘解,但是它往往并不是方程组的准确

解,而当 $m \leq n$ 时,方程组是可能存在准确解的。

阻尼最小二乘法的最大好处是,不论象差有多少种,不论它们是否相关,总可以进行求解,使系统的评价函数进入极值,但它只能使系统进入邻近原始系统的那个极值,如果这个极值是一个局部极值,而不是最小极值,程序无法跳出局部极值,必须通过人工干预。

使用阻尼最小二乘法程序设计光学系

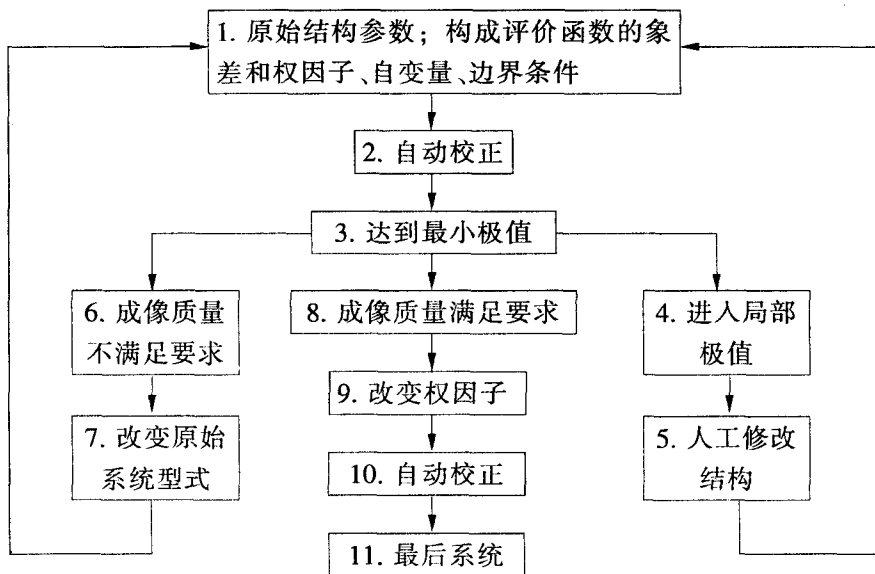


图 7-2

统的一般过程可以用图 7-2 的框图来表示, 下面就根据这个框图加以说明。

(一) 初始数据的准备

进行自动校正之前, 必须按照程序使用说明书的要求, 准备好全部初始数据。对阻尼最小二乘法程序来说, 一般要求输入以下数据: 原始系统结构参数, 构成评价函数的象差和权因子, 参加校正的自变量, 以及边界条件等, 下面分别进行说明。

1. 原始系统的选择

如前所述, 象差自动校正都是在一定的原始系统基础上, 通过线性近似和逐次渐近的方式校正象差的。所以原始系统是自动校正过程中的基础。那种企图用几块玻璃平板, 作为一切自动校正过程出发点的想法是不现实的, 也是不合理的。拿一个简单的双胶物镜来说, 它可能有两类结构, 一类是正透镜在前, 另一类是负透镜在前, 如图 7-3 所示。如果要求系统校正球差、色差、彗差, 根据象差理论的分析 and 工艺性的要求, 前一种结构比后一种结构好, 因为前一种结构的半径大, 高级象差小, 工艺性也好。采用前一种结构作为原始系统进行自动校正, 很快就可以得到满意的结果。如果用两块平行玻璃板作为原始系统, 由于自动校正过程是通过逐次

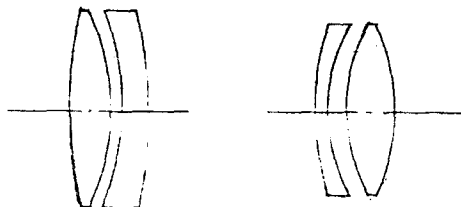


图 7-3

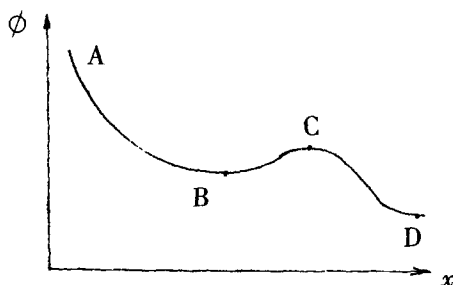


图 7-4

渐近, 反复迭代进行的, 因此势必浪费大量的机器时间, 最后既可能得到第一种结构, 也可能得到第二种结构。一旦系统进入了第二种结构, 是无法自动变到第一种结构的。因为由第二种结构变到第一种结构, 要求透镜的光焦度由负变正, 或由正变负, 它们都必须通过零值。根据校正色差的要求, 系统的总光焦度也必须通过零值, 而系统总光焦度也是校正过程中的一个要求, 因此不可能为零。通过这个简单的例子, 就可以说明, 原始系统的结构对自动校正过程的重要意义。

在阻尼最小二乘法程序中, 原始系统决定了评价函数可能下降到哪个极值如图 7-4 所示。如果原始系统的评价函数处在 A, 程序只能使它下降到局部极值 B, 而不能达到 D, 程序既不能判断系统是否存在更小的极值 D, 也无法跳出局部极值 B。因为要跳出局部极值 B, 评价函数必须首先上升到 C, 而程序是不允许评价函数上升的, 如果上升就要加大阻尼因子重新求解。

某一种结构型式, 存在几个局部极值? 它们在数值上有多大差别? 不同极值在系统结构上有哪些特点? 这些问题自动校正程序都不能直接解决。必须由设计人

员通过大量的研究工作才能搞清楚。因此,原始系统结构参数的确定,必须依靠设计人员的理论知识和实际经验。

对原始系统的另一方面的要求是,希望它不要太多的违背边界条件。否则程序将花很多时间来处理边界条件,而不能校正象差。特别是对那些用冻结和释放的方式来处理的边界条件更应特别注意,因为程序一开始运行,就要把违背边界条件的参数改变到边界上,并把它冻结,如果有很多参数严重违背边界条件,一下把这些参数全部冻结,不作为变量参加校正,降低了系统的校正能力,同时原始系统的象差也被大大的破坏了,甚至可能发生全反射或光线与球面不相交的情况,使自动校正过程无法进行。

2. 构成评价函数的象差和权因子

在阻尼最小二乘法程序中,由于参加校正的象差个数没有限制,也没有严格的要求,因此构成评价函数的象差种类一般比较固定,在编程序的时候,安排少数几种方案供使用者选择。使用者主要是给出各种象差的权因子,权因子一般由系统的光学特性决定,例如大孔径系统应加大轴上象差的权因子,大视场系统则应加大轴外象差的权因子,如果某种象差不参加校正,可以把它的权因子给零。权因子在自动校正过程中的作用是有限的,如果评价函数已经进入局部极限,通过改变权因子使某些象差下降,必然导致另一些象差上升。因为如果只是某些象差下降而没有象差上升,这说明原先评价函数还没有到达极值。权因子的作用只是改变各种象差的比例,而不会使它们同时下降,在设计

的权因子,只是在设计的最后阶段,为了使各种象差达到更好的平衡,才适当改变权因子。

3. 自变量的选择

在自动校正过程中,一般的说自变量越多越好,以便充分利用系统校正象差的可能性。系统中每个曲率、厚度都尽可能作为单独的自变量参加校正,透镜玻璃的折射率和色散,一般只是在用曲率和厚度无法校正全部象差时才采用,通常也不把全部玻璃的折射率和色散作为自变量使用,因为程序给出的结果是理想的折射率和色散值,还必须用近似的实际玻璃来代替,折射率和色散会有一定差别,如果这样的理想玻璃很多,当代换成实际玻璃以后系统的象差可能变化很大。当按实际玻璃进行重新校正时,和原来已经达到的象差校正状态可能差别很大,使原先的校正失去意义。某些透镜的厚度如果对象差不灵敏,也可以不必作为自变量参加校正,例如双胶合物镜的厚度对象差影响很小,一般不作为自变量,直接根据工艺要求确定。

整组透镜的弯曲只用于某些特殊的场合,当要求保持透镜的光焦度不变而只改变透镜组的弯曲形状时才使用。

正负结组变量主要使用在对称系统或折反射系统中。有时如果系统的自变量很多,为了加工方便,使某两个半径保持相等,也可以使用结组变量。

应该注意尽量不要使用相关变量,例如双胶合物镜如果已经把三个曲率作为自变量,就不能再把整组弯曲也作为自变量,因为后者和前三个变量相关。相关变量不仅不会增加系统的校正能力,反而会

破坏校正的正常进行。

4. 边界条件

在阻尼最小二乘法中,边界条件的处理方法通常是把违背量作为象差,加入评价函数进行求解。由于阻尼最小二乘法对象差数并无限制,为了适应各种不同情况的要求,程序允许加入的边界条件一般很多,例如透镜的最小和最大中心或边缘厚度、后截距、共轭距、光焦度、倍率、系统总长度、玻璃总厚度。校正时必须仔细分析,不能把一些不必要的边界条件加入校正,更不能把一些相互矛盾的边界条件一起进入校正,这将大大降低系统校正象差的能力。例如对有限距离成像的系统,共轭距、光焦度、倍率三者只能把其中的两个做为边界条件,第三个就会和前两个发生矛盾。对阻尼最小二乘法来说即使你把很多矛盾的要求都作为边界条件加进去了,程序照样能求解,但破坏了系统的校正能力,评价函数很快陷入局部极值,徒然浪费机器时间,这一点应注意。

当我们选定了原始系统,并按照程序的要求给出了参加校正的象差种类和权因子、自变量、边界条件等等,就可以上机进行自动校正。

(二) 上机和下机

把程序要求的全部初始数据准备好以后,就可以上机进行自动校正。每次自动校正必须让程序有足够的迭代次数,例如10~20次。让评价函数进入极值就可以下机。下机的控制一般有两种方式,一种是人工控制停机,设计人员根据每次迭代输出的评价函数,如果已经不再下降,即人工命令停机;另一种是由程序控制停机,程序规定如果两次迭代函数下降小于一定

的比例,即认为已经进入极值,程序停机。

在程序运行过程中不要去改变权因子,有些人看到程序经过几次迭代某些象差不下降,马上就去改变权因子,这是十分错误的。因为程序总是首先校正那些容易校正的象差,然后校正那些不容易校正的象差。某种象差当前不下降,并不一定说明它以后就不能下降。如果在校正过程中没有达到足够的迭代次数就去改变权因子,这就改变了评价函数的构成,系统将重新按新的方向进行优化。这样反反复复,很可能花了很多机器时间,但系统始终没有进入极值,无法判断系统的实际校正能力。这是使用阻尼最小二乘法自动校正程序中经常出现的一种错误。

(三) 下机后的处理

系统经过一次自动校正下机后,应该作出各种象差曲线和系统图,进行仔细的分析比较。确定系统当前是处于局部极值,还是已经处于最小极值,这一点是比较困难的。前面已经说过,程序本身对这一点无能为力。只能依靠设计人员对该系统象差特性的了解进行判断。如果确定系统当前处于局部极值,根据前面的框图进入(5),即通过大幅度的修改系统结构以后,再重新进入自动校正,以便帮助系统跳出局部极值。在这个过程中,也不要改变权因子,因为权因子改变以后,评价函数的意义改变了,就不能确定两次自动校正的结果,究竟那一个结果好,以及系统是否已跳出原先的局部极值而进入新的极值。

经过若干次自动校正以后,设计者确信系统已经达到最小极值,就可以仔细考

察一下系统的质量。如果离要求相差很远,说明这样的系统不符合使用要求,进入框图(6)(7)。另选一种结构型式作为原始系统,从头开始校正。如果系统已基本满足要求,但各种象差之间平衡得不够好,可以进入框图(9)(10),改变权因子,重新进行自动校正,直到各种象差取得满意的平衡为止,这样整个过程就完成了。

§ 7.5 怎样使用适应法程序

适应法象差自动校正程序的最大特点是:第一,参加校正的象差个数 m 不能大于自变量个数 n ;第二,参加校正的象差不能相关。因为适应法所求的解,严格满足象差线性方程组的每个方程式,如果某两种象差相关,象差方程组就无法求解,校正过程就要中断。

上述第二个要求,是使用适应法程序中最难处理的问题,我们难于判断各种象差是否相关。因为某两种象差是否相关,并不是固定的,而和系统的光学特性、结构型式、系统的校正能力等一系列因素有关。例如 OSC' 、 K_s' 、 K_r' 这三种象差都表示彗差,它们在初级象差范围内是相关的,如果系统的孔径和视场不大,就不能让三种象差同时参加校正。但是,如果系统的现场比较大,子午视场高级彗差和弧矢视场高级彗差较大,它们就是不相关的了,可以用时参加校正。对不能校正 S_N 的系统来说 X_i' 和 X_j' 是相关的,如果系统能校正 S_N 则 X_i' 和 X_j' 就不相关了。又如根据初级象差理论,一个薄透镜组无论结构如何复杂,只能校正两种初级单色象差,第

三种象差就成为相关的了。从上面这些例子可以看到,确定象差是否相关,除了依靠象差理论而外,还必须根据系统的具体情况,在设计过程中根据象差的实际变化逐步加以确定。因为我们对系统的校正能力,和高级象差的大小在设计开始阶段并不完全清楚。

为了使设计人员比较容易解决这个问题,不致使自动校正过程中断,在适应法程序中,一般都要安排一个相当复杂的适应过程,适应过程一般包括如下的功能:

1. 根据系统的校正能力,逐步增加进入校正的象差。这样设计者可以首先把那些有把握能校正的象差进入校正,然后逐步增加象差。不致于一下由于相关象差的加入而使校正中断。

2. 设计者除了给出各种象差的目标值而外,还可以给出一定的公差范围,程序能在给定的公差范围内调整各种象差的实际目标值,并自动排除在公差范围内的相关象差。这样就不致由于目标值给得不恰当而使校正中断。

3. 可以根据系统的校正能力,逐步收缩象差公差的范围。这主要是使程序能最大限度的挖掘系统的校正能力。

适应过程的作用,总的来说就是使设计人员能比较容易的向系统提出象差要求,程序能自动使象差要求和系统的校正能力之间达到逐步适应。下面我们就介绍程序的使用方法。

(一) 初始数据的准备

使用适应法自动校正程序,和阻尼最小二乘法程序一样,也必须首先选择一个适当的原始系统。此外一般还要求给出下列数据:参加校正的象差种类和进入校正

的先后顺序,系统的目标值和公差,自变量,边界条件等。下面分别说明:

1. 参加校正的象差种类和校正顺序

和阻尼最小二乘法不同,在适应法程序中,哪些象差参加校正,设计者必须经过仔细挑选。在程序中为了适应各种不同的系统,可以参加校正的象差种类和边界条件一般比较多,其中不少可能是相关的,设计者必须根据系统的具体要求和它的实际校正能力,挑选若干种象差进入校正。它们的要求是,进入校正的象差彼此不能相关,在能够控制系统质量的条件下,参加校正的象差尽量少。它和手工校正时选择校正象差种类的情况相类似。例如对望远镜物镜来说,一般只要校正 $\delta L'$ 、 OSC' 、 $\Delta L'_{rc}$ 三种象差就够了。对玻璃材料不作为变量的双胶物镜来说只能校正两种象差,第三种便是相关的了。对目镜则主要校正 x'_t 、 $\Delta y'_{rc}$ 和 K'_T ,而对于对称式目镜来说(两个透镜组完全对称), K'_T 是相关的不能加入校正。对照相物镜来说,情况就复杂得多了,除了初级象差(相当于实际象差的边缘象差)而外,还要校正若干高级象差(相当于实际的剩余象差)。在设计开始阶段很难完全决定哪些象差需要校正,哪些象差不需要校正。处理的方法是先让一部分象差加入校正,然后在校正过程中,根据具体情况让其它象差逐步加入校正。例如前面讲过的三种彗差,在设计开始阶段我们不能确定它们是否相关,可以先让其中的一个象差如 K'_T 加入校正。当校正到一定阶段,发现校正了 K'_T 并不能使代表小视场的 OSC' 满足要求时,

再把 OSC' 加入校正。如果校正了 K'_T 、 OSC' 后 K'_s 仍然较大,再把它加入校正。当然还必须考虑到系统的实际校正能力,因为系统不一定能同时校正这三种彗差。所以在适应法程序中,除了挑选出需要校正的象差种类而外,还要给出进入校正的顺序和每一批进入校正的象差数。上述工作是使用适应法程序的关键。如果盲目地把很多相关象差加入校正,使象差线性方程组根本无法求解,校正不能进行,这是需要特别注意的。

2. 象差的目标值和公差

适应法程序在校正过程中,每种象差分别趋向各自的目标值,但是有些象差,例如高级象差,设计人员很难知道系统究竟能校正到什么程度,如果目标值给得不恰当,程序无法求解,校正就会中断。因此在程序中除了给出象差的目标值而外,还可以给出一定的公差。程序能够在给定的公差范围内,调整各种象差的实际目标值,使校正过程不致由于目标值给得不合理而中断。而且可以采取逐步收缩某些象差的公差范围的方法,使系统充分发挥它的校正潜力。

在确定象差种类、校正顺序、目标值、公差时,最好先计算一下原始系统的象差,这样可以使这些数据给得更加准确和有针对性。

3. 自变量和边界条件

在适应法中自变量的选择和阻尼最小二乘法相同,这里不再重复。边界条件和阻尼最小二乘法有些差别。因为在适应法程序中参加校正的象差数是有限制的,因此作为象差处理的边界条件就不能太多。

一般只把后截距、焦距、倍率、入瞳距等少数几种比较重要的边界条件可以作为象差处理。即如果违背边界条件则把它冻结在边界上,经过若干次迭代后,再释放。释放之后再违背则再冻结。适应法程序中允许加入的边界条件一般比阻尼最小二乘法少,究竟加入哪些边界条件应该比使用阻尼最小二乘法程序更慎重,因为不合理的边界条件,同样会使校正过程无法进行。

(二) 下机处理

初始数据准备好以后可以上机进行校正。适应法自动校正程序的停机,一般由程序自动控制停机。停机状态可能有以下两种:

1. 校正完成:各种象差都达到了目标值或进入公差。

2. 校正中断:系统校正到一定阶段,由于象差线性方程组无法求解而使校正中断。校正中断的原因可能是进入校正的象差数多于自变量数,或者进入校正的象差相关,程序无法求解。

下机以后,首先看是属于哪一种停机状态,如果是属于第一种停机状态,则可以增加被校正的象差数,或者改变象差的目标值或缩小象差公差,重新上机,使系统尽可能校正得更好。如果是第二种停机状态,则可以减少参加校正的象差数,改变它们的校正次序或目标值,扩大象差的公差等,然后重新进行校正。

在程序运行过程中,由于象差相关而无解时,程序能够判断是由于哪一种象差相关而造成无解的,如果相关的象差在公差范围内,程序能自动将它排除在校正之外,继续求解,如果已超出公差则程序停

机。

当各种象差已校正的尽量小,系统的校正潜力已全部发挥出来时,如果象差结果符合要求则设计完成。如果仍不能满足要求,就需要改变原始系统的结构型式,重新进行校正。

§ 7.6 使用适应法程序的例子

1. 双胶合望远镜物镜设计

设计双胶合望远镜物镜, $f'=300\text{mm}$, $D=40\text{mm}$, $2\omega=6^\circ$,入瞳和物镜重合,在透镜后面的会聚光路中有一棱镜系统,棱镜展开厚度为160mm,要求系统校正球差、彗差、轴向色差。

根据薄透镜的初级象差理论,双胶合组如果玻璃材料一定,只能校正两种象差,要校正三种象差必须选用合适的玻璃组合。玻璃确定以后,还只有三个曲率作为自变量使用(厚度对象差影响较小,一般不作为自变量)。

根据适应法的要求,象差个数不能超过自变量的个数,因此除了光焦度的要求而外,最多只能校正两种象差。如果要求校正更多的象差必须把玻璃的光学常数也作为自变量使用。每种玻璃有两个自变量(折射率和色散),两块玻璃就有四个自变量。表面上似乎可以校正更多的象差,但是根据象差理论,一个薄透镜组无论结构多么复杂,最多只能校正两种单色象差,所以即使把玻璃的折射率和色散作为四个自变量参加校正,也只能增加一种象差,恰好能达到上面对系统提出的象差要求。

使用象差自动校正程序设计这样一个双胶合物镜,可按两种不同的方式进行。第一种方式是四个光学常数和三个半径

都作为自变量,校正球差、彗差、轴向色差三种象差,再加系统的光焦度共四种象差(为了简单我们把光焦度也称为象差)进入校正。我们认为这不是一种好的方式,因为光学常数作为自变量参加校正,得出的结果不可能和实际玻璃的常数完全一致,换成实际玻璃以后还要重新校正,既浪费机器时间,还不一定能获得满意结果,因为玻璃的工艺性和物理性能可能不好。另一种方式是首先根据初级象差公式由双胶物镜 P_0 表选出合适的玻璃组合,以三个曲率半径作为自变量,校正光焦度、球差、轴向色差三种象差,正好符合适应法中 $m \leq n$ 的要求,可以很快得出结果,我们采用后一种方式。

设计的第一阶段工作是利用初级象差选玻璃,选出一对工艺性较好的玻璃组合 K_9-F_5 。选出玻璃以后,不必再求出初始半径,可以直接根据系统的焦距要求,给出大略的半径,作为自动校正的初始结构,我们给出的初始结构参数如下:

校正的象差种类,目标值和公差如下表:

象 差	φ	$\delta L'$	$\Delta L'_{rc}$
目标值	0.003333	0	0
公 差	0	0	0

三种象差一批进入校正。

自变量三个: c_1 、 c_2 、 c_3

边界条件:正透镜边缘厚度不小于2,负透镜中心厚度不小于3。按以上初始数据进入自动校正,1~2分钟内即可得出结果如下:

r	d	n_D	
161.12		1.0	
	5	1.5163	K9
-133.77			
	3	1.6242	F5
-663.44			
	10	1.0	
∞			
	160	1.5163	K9
∞		1.0	

	α	n_D	n_F	n_C	
$r_1=150$		1.0	1.0	1.0	
	5	1.5163	1.52195	1.51389	K9
$r_2=-150$					
	3	1.6242	1.63663	1.61925	F5
$r_3=\infty$					
	10	1.0	1.0	1.0	
$r_4=\infty$					
	160	1.5163	1.52195	1.51389	K9
$r_5=\infty$					
		1.0	1.0	1.0	

三种象差结果如下:

象 差	φ	$\Delta L'_{\text{FC}}$	$\delta L'$	OSC'
原始系统	0.0027	-0.233	1.64	-0.0025
最后系统	0.003333	-0.0023	-0.0015	-0.0012

由以上结果看到参加校正的三种象差 φ 、 $\delta L'$ 、 $\Delta L'_{\text{FC}}$ 已完全达到要求, OSC' 虽然未参加校正, 也减小了, 符合公差要求, 这是因为玻璃组合是预先按校正球差、彗差和色差的要求利用初级象差公式和表格选出来的。

2. 广角目镜设计

设计一广角目镜, 其光学特性为 $f' = 30\text{mm}$ 、 $|l_z| \geq 20\text{mm}$ 、 $l'_z = 300\text{mm}$ 、 $2\omega = 60^\circ$ 。我们采用以下的初始数据作为自动校正的出发点:

r	d	n_D	n_F	n_C	
∞		1.0	1.0	1.0	
-31	5	1.5163	1.52195	1.51389	K9
62	0.2	1.0	1.0	1.0	
-62	6	1.5163	1.52195	1.51389	K9
31	0.2	1.0	1.0	1.0	
-31	11	1.5163	1.52195	1.51389	K9
31	2.5	1.7550	1.77476	1.74733	2F6
∞	7	1.5163	1.52195	1.51389	K9
		1.0	1.0	1.0	

要求校正的象差种类和目标值、公差如下:

象 差	φ	X'_i	$\Delta Y'_{\text{FC}}$	K'_T
目标值	0.0333	0	0	0
公 差	0	0	0	(0.08)

开始首先让前三种象差进入校正, 当它们达到目标值以后再让第四种象差 (K'_T) 进入校正, K'_T 的公差为 (0.08), 表中用括弧括起来表示要求程序在该象差进入公差以后继续逐步收缩公差带 (我们的程序中规定最多可以使公差带缩小一半)。

自变量四个: c_5 、 c_6 、 c_7 、 c_8 。

边界条件: 正透镜边缘厚度不小于 1.0, 负透镜中心厚度不小于 2.5。入瞳距

l_z 没有作为边界条件加入, 因为原始系统 $|l_z|=26.1$, 比要求的最小值 20 大得很多, 可以不加入校正。按上述数据进入自动校正, 最后结果如下:

r	d	n_D	
∞		1.0	
	8.17	1.5163	K9
-31			
	0.2	1.0	
62			
	8.62	1.5163	K9
-62			
	0.2	1.0	
92.58			
	11.24	1.5163	K9
-29.63			
	2.5	1.7550	zF6
65.05			
	7	1.5163	K9
-64.65			
		300	1.0
∞ (光栏)			1.0

由以上象差结果看, φ 、 X'_i 、 $\Delta Y'_{FC}$ 都已达到目标值, K'_T 进入公差带, 并且把公差带收缩了一半 (由 0.08 收缩到 0.04)。如果我们进一步校正彗差, 系统的色畸变很快增加, 因此我们不再继续校正。而且彗差值已经不大。

(完)

象差结果如下:

象差 h, ω	$\delta L'$	$\Delta L'_{FC}$	X'_i	X'_j	$\Delta X'_k$	K'_T	$\delta Y'_z$	$\Delta Y'_{FC}$
1.0	-0.125	-0.135	-0.044	-2.53	2.49	-0.043	-1.74	0
0.707	-0.062	-0.134	-0.626	-1.46	0.84	-0.044	-0.71	-0.019

$f'=29.994$, $l'=11.7$, $Y'_0=17.37$, $l_k=-25$ 。